引用格式：耿端阳，许通，朱庆华，等. 数字化能源管理系统促进工业界节能减碳的分析与建议. 中国科学院院刊，2024, 39(2): 311-322, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230516001.
Geng D Y, Xu T, Zhu Q H, et al. Analysis and recommendations for energy conservation and carbon emission reduction in industry boosted by digital energy management systems. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(2): 311-322, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230516001. (in Chinese)

数字化能源管理系统促进工业界节能减碳的分析与建议

耿端阳[1] 许 通[2] 朱庆华[3*] Steve EVANS[1]

1 英国剑桥大学 工程系制造研究所 剑桥 CB3 0FS
2 英国剑桥大学 土地经济系 环境能源与自然资源管理中心 剑桥 CB3 3QZ
3 上海交通大学 安泰经济与管理学院 上海 200030

摘要 工业生产是碳排放的主要来源。减少能源浪费、达成生产节能对实现我国“双碳”目标至关重要。随着数字化技术进步，数字化能源管理系统可通过将不可见的能源可视化，促进企业节能。文章分析了英国、美国、德国、日本和瑞典应用能源管理系统的现状，总结了其特点与应用条件，与我国在此方面的发展进行了对比，并探讨了我国在部署能源管理系统过程中所面临的挑战。文章还提出从“工厂、产线和设备”到“产品”角度分析能耗，构建“基于生产步骤的单位产品能耗标签”的方法论框架。探讨了政府、企业等利益相关者在该方法论中的角色，并提出了政府支持发展数字化能源管理系统的对策，包括推动系统建设、支持合作、确定能耗基准和引导企业对标行业最优实践。

关键词 数字化技术，能源浪费，能源管理，能源系统，碳中和

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230516001
CSTR 32128.14.CASbulletin.20230516001

随着气候变化日益加剧，碳减排问题受到全球普遍关注。2015年通过的《巴黎协议》，旨在将全球平均温度上升幅度控制在1.5℃以内[1]。为实现这一目标，西方各国采取国家自主贡献措施，定期审查和提高减排承诺①[2]。我国也积极响应，2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布：

*通信作者
资助项目：国家自然科学基金创新群体（72221001），国家自然科学基金重大项目课题（72192830、72192833）
修改稿收到日期：2023年11月24日
① United Nations. Nationally Determined Contributions Registry (2023). [2023-04-12]. http://unfccc.int/NDCREG.

中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

工业是碳排放的重要来源。2022年全球工业碳排放为9.2 Gt，占总排放量的25%[2]。我国作为世界第一大工业国家，工业碳排放约2 888 Mt，占总排放量的28%以上②。降低工业碳排放的主要途径主要包括：使用清洁能源，碳捕集、利用和封存，节能。我国能源结构尚处于向清洁能源转型的初期，碳捕集、利用和封存相关技术也尚不成熟。因此，节能是工业界降低碳排放的主要手段，而减少能源浪费（即高于最优能耗的用能）[3]，是实现节能的创新思路。以保守估计，我国工业企业中存在10%—20%的能源浪费[4]，对应约有300 Mt的碳减排空间。

我国政府密切关注工业界能源浪费问题。我国针对工业能源浪费问题陆续出台了一系列文件，如2011年国家能源局发布的《重点用能单位节能管理办法》③、2016年国务院发布的《“十三五”节能减排综合工作方案》④、2017年国家发展和改革委、国家能源局印发的《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》⑤等文件，要求重点耗能行业实现能源在线监测以持续降低能耗。2021年，国务院发布《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书，提出强化能源节约与能效提升，实现用电管理可视化、自动化、智能化⑥。

相比于物料、人力资源等可见资源，能源具有不可见性。精益生产等解决思路已广泛应用于解决可见资源的浪费，但能源浪费却由于不可见性和过去能源价格较低经常被忽视。通过数字化能源管理系统（Digital Energy Management System），企业可以实时监测生产能耗数据，分析生产环节的高能耗操作，进而减少能源浪费，为企业带来可观的节能效益。例如，河北金隅鼎鑫水泥公司于2015年建立数字能源管理系统，通过分析日常能耗，发现电耗量与机器转速和变频相关；通过调整机器的运行方案，一年节约用电48.8万度[5]。

本文针对我国工业界能源浪费和数字化能源管理系统具体应用不成熟等问题，分析数字化能源管理系统在国外工业界的应用情况和我国所面临的挑战和机遇。提出“基于生产步骤的标准能耗标签”概念和数字化能耗数据分析的方法论框架，并分析企业、政府等利益相关者的角色，提出政府通过数字化能源管理系统实现工业减排的对策建议。

1 数字化能源管理系统及国内外的发展概况

1.1 数字化能源管理系统简介

数字化能源管理系统主要采用物联网、云计算、大数据分析等技术，通过实时监测和分析用能数据，可视化能源使用，最终提高能效、降低能耗。一些案例也证明了数字化能源管理系统的优势。例如，中国宝武钢铁集团利用数字化能源管理系统优化生产过程中的能源消耗，实现了降低碳排放和提高能源使用效

② International Energy Agency. China Data Explorer (2023). [2023-04-14]. https://www.iea.org/countries/china.

③ 国家能源局. 重点用能单位管理办法. (2011-08-18)[2023-04-15]. https://www.nea.gov.cn/2011-08/18/c_131057691.htm.

④ 国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知. (2016-12-20)[2023-04-16]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5163448.htm.

⑤ 国家发展改革委, 国家能源局. 两部门印发《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》. (2017-04-15)[2023-04-16]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm.

⑥ 新华社. 中国应对气候变化的政策与行动. (2021-10-27)[2023-04-16]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content_5646697.htm.

率的目标⑦；德国巴斯夫公司采用数字化能源管理系统进行能源管理和控制，提升能源效率⑧。

1.2 国际数字化能源管理系统的应用

在国际上，数字化能源管理系统的应用已取得很大进展（表1）。

英国。2014年，英国能源与气候部门与监管机构Ofgem发布《智能电网远景与路线图》（*Smart Grid Vision and Routemap*），推动企业部署标准的数字化能源管理系统，实现对企业用能的实时监测与优化[6]。该智能电网可以实时收集和分析电力需求，帮助企业在能耗高峰期和低谷期之间进行调整；支持分布式能源（如太阳能、风能等）的并网接入，使企业能够降低对传统能源的依赖。该智能电网还可以实时传递电价信息，让企业在价格低时消耗更多电力，价格高时减少电力消耗，在整体上降低了英国工业界的能源浪费。但智能电网也存在一些缺点：智能电网的建设和维护成本很高，可能导致企业在短期内面临较大的财务压力；智能电网收集和传输大量的用户数据，可能引发数据安全和隐私担忧。

美国。美国政府于1978年推出“联邦能源管理计划”（Federal Energy Management Program）；1992年美国环境保护署和能源部推出“能源之星自愿性能源效率项目”，同时推动企业广泛采用数字化能源管理系统，实现能耗的实时监测和分析⑨。另外，美国能源部于2011年提出的“卓越能源绩效计划”（Superior Energy Performance Program, SEP），是一个基于ISO50001标准的认证计划，它提供系统方法改进企业的能源性能，并通过认证程序来验证这些改进⑩。美国的大型企业，如福特公司、3M公司、宝洁公司等均有自己的能管系统和较为明确的减排目标；美国江森自控有限公司等专业能源管理公司则利用其在数字解决方案、硬件设备等软硬件结合的技术，为众多工业企业建立数字化能源管理系统⑪。

德国。德国政府于2011年通过《能源转型和气候保护法案》，推出“能源转型”计划；2023年发布《气候保护法》和《能源效率法案》，要求一定能耗规模的企业建立能源管理或环境管理系统⑫。德国能源供应商意昂集团在客户设施中安装传感器和智能计量设备，实时收集包括用电量、用气量、用水量的能源数据，并将数据上传到云端平台，利用大数据分析，识别能源使用中的异常和浪费，帮助客户发现潜在的节能机会，提供定制化的能源优化建议，并协助实施这些节能措施[7]。该公司的数字化能源管理系统的优缺点与英国智能电网计划类似。另外，德国众多工业企业通过了ISO 50001能源管理体系认证，发布了明确的2030降碳目标；许多工业龙头企业，如巴夫斯公

⑦ 郝荣亮，刘刚．宝武集团信息化数字化标杆研究．(2022-05-03)[2023-04-20]. https://www.amt.com.cn/news/970.html.
⑧ BASF. Reducing emissions along the value chain (2023). [2023-04-20]. http://www.basf.com/energymanagementsystem.
⑨ US Department of Energy. Federal energy management program (2023). [2023-04-20]. https://www. energy. gov/femp/federal-energy-management-program.
⑩ US Department of Energy. Superior energy performance (2023). [2023-04-21]. https://www.energy.gov/eere/iedo/superior-energy-performance
⑪ John Controls. Energy and Efficiency Solutions (2023). [2023-04-21]. https://www. johnsoncontrols. com/services-and-support/energy-and-efficiency-solutions.
⑫ Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des BundesKlimaschutzgesetzes. (2023-06-13) [2023-11-22]. https://www. bmwk. de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/entwurf-eines-zweiten-gesetzes-zur-aenderung-des-bundes-klimaschutzgesetzes.pdf?__blob=publicationFile&v=8.
Bundesministerium der Justiz. Energy Efficiency Act. (2023-11-13)[2023-11-22]. https://www.gesetze-im-internet.de/enefg/index.html.

司、宝马公司、西门子公司等，已通过能管系统显著减少能源浪费。

日本。日本政府于1979年制定并推行以《能源保护法案》（*Energy Conservation Act*）为基础的能源管理制度，要求高耗能工厂建立能源管理系统，指定能源管理责任人，并进行定期能源审计⑬。同时，日本工业技术研究院主导推动“工业能源管理系统”项目，研发数字化能源管理系统，并同时推广其标准和认证机制。另外，日本工业界龙头企业，如日立公司，开发了综合的能管系统解决方案，不仅在日立公司使用这些能管系统，还向其他公司提供能源系统服务⑭。

瑞典。瑞典政府对企业的能源管理有严格要求，在企业中推行能源审计计划，并设立了清晰的能源效率标准。2003年推行“可持续生产力计划”（SPI），旨在提高工业能源效率、减少能源浪费。瑞典法律规定，年销售额超过5 000万欧元的企业须每4年进行1次能源审计，公司拥有认证的能管系统可免于审计，但其能管系统需要提供具体的节能措施[8]。轴承制造商斯凯孚、商用车制造商斯堪尼亚、通信设备制造商爱立信等企业均遵照该法规建立数字化能源管理系统，显著减少能耗。同时，瑞典企业也十分重视能管系统建设，例如：斯凯孚是全球首批完成ISO 50001认证的企业，不仅自身优先部署能管系统，同时还将其能管系统推广至供应链上的企业；与其他较小规模工业钢铁终端客户合作，参与Steel Zero 2和Responsible Steel 3倡议，推动钢铁行业净零排放转型。瑞典在推动能管系统部署的相关制度在国际领先，但是这也得益于瑞典总体上工业企业数量较少，利润空间也相对较大。因此瑞典的相关经验推广到世界其他国家的适用性相对有限。

综合其他国家情况，数字化能源管理系统的建设需要政府、企业等多方协作，同时对相关技术的要求也较高。另外，数字化能源管理系统的部署需要龙头企业或政府牵头，形成统一化、标准化的数字化能源管理系统的产业集群，以降低全产业的能源浪费。

表1　国际典型国家能源管理系统的特点及应用条件

Table 1　Characteristics and application conditions of energy management system in typical international countries

国家	数字化能源管理系统应用特点	数字化能源管理系统应用条件
英国	政府推动力较强，能源、电力公司为生产企业可以提供较为全面、统一、标准的能源数据和技术服务	英国政府具有较强的推动意愿；英国能源公司可以在收集能源数据的同时保证用能企业数据安全性；用能企业愿意配合部署相应的标准化传感器
美国	美国政府通过政策制定、部门设置等方式推动数字化能源管理系统建立，美国众多大型企业对数字化能源管理系统应用较为深入	美国企业总体上在数字化能源管理系统方面具有国际领先的技术优势
德国	德国工业化发达，政府推动力较强，数字化能源管理系统应用普及程度较高。大型企业在政府政策引导下，起到带头作用	德国政府推动意愿强，大型企业积极配合政府政策
日本	政府发布相关政策，大型企业自主性较强，建立了完善的能管服务体系和新的商业模式，为中小型企业提供软硬件配套服务	日本的大型企业有较高的科技与经济实力，并且关注数字化、节能转型
瑞典	瑞典政府对能源管理和温室气体排放有严格要求，在企业中推行了能源审计计划，并设立了一系列清晰的能源效率标准	瑞典经济发达，有较强的工业基础，大型企业和世界500强占比高，有足够的经济与科技实力在全供应链环节采用能管系统

⑬ International Energy Agency. Act on the rational use of energy (Energy Efficiency Act). (2017-11-05)[2023-04-22]. https://www.iea.org/policies/573-act-on-the-rational-use-of-energy-energy-efficiency-act.

⑭ Hitachi. Distributed Energy Resource Management Systems (DERMS) (2023). [2023-04-23]. https://www.hitachienergy.com/uk-ie/en/products-and-solutions/scada/network-management/network-manager-adms/distributed-energy-resource-management-system-.

1.3 我国数字化能源管理系统应用情况

我国数字化能源管理系统的应用和发展也在不断进步，但尚存一些困难和挑战。

*我国工业界数字化能源管理系统的应用比例在逐渐提升，且已有许多推进工业界应用数字化能源系统的优秀案例。*例如，广东省自2012年发布《广东省推进能源管理体系工作实施方案》⑮推动能源管理体系至今，已有许多企业部署了数字化能源管理系统，通过实现能源的智能化管理和控制，有效降低了能源消耗和碳排放。苏州市2019年开展重点用能单位“百千万”行动，要求按照GB/T—23331《能源管理体系要求》等相关标准的要求，建立健全能源管理体系，加强能源计量统计分析，建设完善能耗在线监测系统，提升能源管理信息化水平⑯。2022年12月，北京市发展和改革委发布的《北京市进一步强化节能实施方案（2023版）》明确指出，节能是“第一能源”，是降碳减污的源头措施⑰。通过在工业生产的各个环节采用节能措施，企业可以降低单位产值的碳排放量，从而从根源上控制碳排放以达到减碳之目的。例如，中国石化燕山石化公司积极推进化工余热利用项目，通过联合热泵系统等高效清洁供暖技术，降低了蒸汽的消耗⑱; 西子航空工厂基于工厂内的大数据分析及时调度储能和用热，用热低峰时使用熔盐罐储热，用热高峰时使用全钒液流和氢燃料电池供热，削峰填谷，实现最优节能，估计每年可节约标准煤2 100吨⑲。

*相比国际先进水平，我国数字化能源管理系统在普及和发展程度、综合运营能力、政策支持、系统功能多样性、能耗数据完整度和技术创新方面尚有较大提升空间。*早在1960年，日本就开发了第1个能源管理系统。1973年“能源危机”后，耗能在西方工业化国家引起了极大的重视，经过数十年的发展和沉淀，已逐步发展出健全、智能化、运营效率高的数字化能源管理系统。而我国直到20世纪80年代中期，才开始推进能源管理，从采用“能量平衡测试”、“能源审计”促进用能单位装设计量仪表；到淘汰高耗能设备，进行厂房节能改造等；再到如今数字化能源管理系统的兴起。由于缺乏相关政策支持和企业对于能源管理的了解、普及程度低，导致了各行业、各地区发展程度参差不齐[9]。

*目前国内大部分工厂现有的能管系统功能单一，仅能根据电表的数据进行简单的能耗计量和分析。在实现数据流实时分析、发现管理盲区、识别节能方法等方面仍有很大提升空间。*同时，大部分企业能耗相关的数据分散在各个生产系统中，没有实现关联分析，很难进一步挖掘能管系统的价值。另外，国内企业能源浪费评估的标准各异，没有建立统一行业标准。在运营管理方面，由于涉及的管理人员和技术部门众多，需要大批的复合型人才和与之匹配的健全管理体制。总体来说，目前我国处于重视系统基础建设而轻视运营的初始发展阶段。

---

⑮ 广东省工业和信息化厅. 广东省经济和信息化委等4部门关于印发广东省推进能源管理体系工作实施方案的通知. (2012-09-28)[2023-04-23]. http://gdii.gd.gov.cn/2012n3127/content/post_925950.html.

⑯ 苏州市人民政府. 关于做好我市重点用能单位“百千万”行动工作的通知. (2019-07-12)[2023-04-25]. https://www.suzhou.gov.cn/szsrmzf/bdwglywwjib/201907/WEYNDU1448O9JKKXTGLXZOBNW3S6IEEM.shtml.

⑰ 北京市发展和改革委员会. 北京市发展和改革委员会等11部门关于印发北京市进一步强化节能实施方案(2023年版)的通知. (2022-12-16)[2023-04-25]. https://fgw.beijing.gov.cn/fgwzwgk/zcgk/bwqtwj/202212/t20221216_2880090.htm.

⑱ 中国工业报. 燕山石化：打造安全绿色高质量发展典范. (2022-11-24) [2023-04-25]. https://new. qq. com/rain/a/20221124A070HB00.

⑲ 杭州日报. 全国首家航空零部件“零碳工厂”在杭启用. (2021-11-23)[2023-04-26]. https://www.hangzhou.gov.cn/art/2021/11/23/art_812266_59044808.html.

国内大部分中小企业自身缺少建设数字化能源管理系统的经验与技术，也缺乏对于数字化能源管理系统的算法、分析和运营管理的知识。目前我国数字化能源管理系统主要由互联网公司、科技公司，如阿里巴巴、华为、腾讯等搭建和推动，并由工业企业购买数字化能源管理系统方案服务后再在内部实施落地。然而，搭建数字化能源管理系统只是第一步，后期运行过程中的动态调整、数据分析、识别能源浪费点并采取相应节能措施才是重中之重，仅靠外部公司很难最大化生产企业数字化能源管理系统的应用价值。

2 我国工业企业部署数字化能源管理系统所面临的挑战

数字化能源管理系统作为工业4.0中智能物联的重要产物，将会对我国工业界能源管理带来各种机遇与挑战。图1总结了政府、技术、企业3个层面所面临的挑战。

2.1 政府层面

（1）政府推动企业部署数字化能源管理系统所遇到的阻力。推动我国企业部署数字化能源管理系统受限于缺乏相应的法律法规，因此无法强制要求所有企业全部部署。目前我国政府整体上采用奖励的方式鼓励企业安装数字化能源管理系统。然而，政府方面在推动数字化能源管理系统面临着一系列挑战与难题，如：如何最有效地鼓励企业部署能管系统？哪些企业该优先部署能管系统？企业部署能管系统的标准是什么？

（2）政府监管数字化能源管理系统的标准化问题。对于已部署数字化能源管理系统的企业，政府面临规范化、标准化能管系统建设的问题。政府应要求企业上报哪些能源信息？为确保企业数据隐私的安全性问题，政府应该建立怎样的上报机制？如果不对企业进行适当的标准化和规范化，未来各企业部署的数字化能源管理系统可能会在各方面存在差异，导致企业间用能数据无法横向对比，政府也难以收集相应数据对企业用能进行统筹规划与管理。

（3）政府公布的数据对用能企业缺乏参考性。针对高能耗的行业和产品，2021年我国政府已经出台了《2030年前碳达峰行动方案》《“十四五”节能减排综合工作方案》等文件，披露了能耗标准值及对标值。但是，目前政府所给出的能耗标准值往往是比较模糊的单位能耗总值，一般针对一个宽泛的产品品类或行业。各用能单位即使生产类似产品，也会有诸多差别，导致其用能情况大不相同。另外，政府对公布的能耗标准值缺乏解释，企业无法了解政府获取、整理及分析数据的方式。因此现有的能耗标准值很难实质性指导企业找到能源浪费。

2.2 技术层面

（1）硬件设备限制。受限于能源传感器硬件条件，部分能源数据无法获取或无法保证其精准度及长期的稳定性。尤其是对于燃气、蒸汽等非电能能源，如果传感器量程选择错误，在瞬时能耗过高或过低的时段，能源数据测量很可能失真。另外，能管系统需要与各种设备进行交互，工厂生产设备往往来自不同厂商，使用不同的通信协议和接口，因此存在兼容性问题。

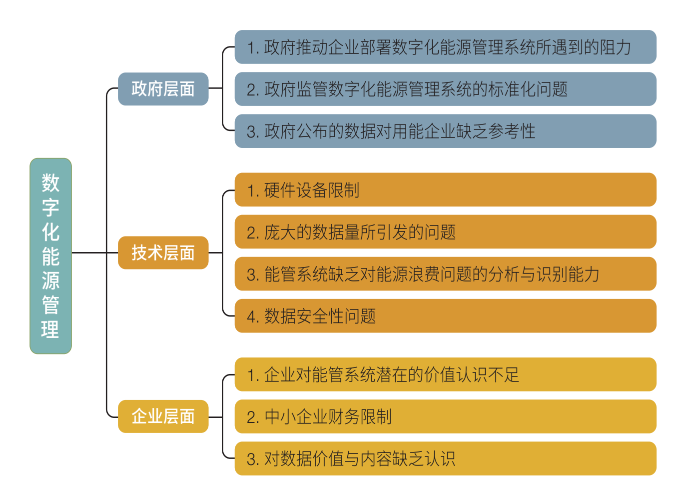


图1　我国工业企业部署能管系统所面临的挑战

Figure 1　Challenges faced by Chinese industrial enterprises in deploying energy management systems

（2）庞大的数据量所引发的问题。工厂生产系统十分复杂，同时产量庞大。实时监控用能情况、收集用能数据，会产生巨大数据量，为企业带来额外负担。另外，庞大数据量对能管系统算力要求高，算力不足会导致能管系统运行缓慢、无法进行实时分析、出现各种漏洞、设备掉线、设备间数据无法匹配等诸多问题。若无法处理好此难题，会对能管系统的稳定性、实时性和准确性产生较大影响。

（3）数据安全性问题。由于能源数据与生产数据息息相关，企业也十分关注能源数据的安全性，防止竞争对手及其他相关方根据能源数据反推企业生产数据，对企业核心业务造成不良影响。但目前数字化能源管理系统对数据安全性的重视程度较低，存在泄露企业机密的风险。

（4）数字化能源管理系统缺乏对能源浪费问题的分析与识别能力。对于不可见的能源，数字化能源管理系统具有巨大的实际价值，可以帮助企业了解其生产的用能情况。但目前绝大多数的能源管理系统自身发展尚处于初级阶段，只能反馈企业用能情况，无法分析识别能源浪费点，仍需要专业人员根据能源信息进行分析得出真正的能源提升点，导致企业对数字化能源管理系统实际价值存疑。

2.3 企业层面

数字化能源管理系统的出现也为工业生产企业带来诸多挑战。

（1）企业对数字化能源管理系统潜在的价值认识不足。在许多非高能耗企业中，能源支出占比较低。因此，许多企业对于数字化能源管理系统可带来的经济回报存疑。然而，根据近些年来的发展形势，企业能源绩效将对企业自身发展造成更多影响。① 自俄乌冲突、石油危机等“黑天鹅”事件以来，能源价格不断上涨，导致企业能源支出不断上升。我国能源价格涨幅相比国际部分地区相对较低，但能源价格也呈现增长的趋势。② 国内外持续增强对碳中和、碳达峰等目标的关注，相应的法律法规必然愈加严格。例如，碳交易和碳税的推动会潜在增加用能成本，因此应提前布局企业的节能管理。③ 能源管理，这类与碳排放直接相关的技能，未来将在前两点背景下不断演变成为企业的核心竞争力之一。目前已经可以看到许多，尤其是西方企业，如苹果、丰田、微软等公司，将节能减排、碳中和等作为企业自身的核心竞争力之一进行宣传，并对其供应链企业做出碳排放限制。我国企业也应在相关方面提前布局、谋取长远发展。

（2）中小企业财务限制。数字化能源管理系统的安装、运营及管理成本偏高，安装该系统也可能需要对原有产线进行更新。尽管数字化能源管理系统得益于我国物联网行业的飞速发展，总体成本在逐年下降，但对于中国企业尤其是众多的中小型企业，数字化能源管理系统所带来的经济压力依然偏大。另外，部署数字化能源管理系统意味着企业需要在常规生产活动外增加一个新关注点，需要具有相关专业知识的人员开展工作。这会进一步增加企业部署数字化能源管理系统在人力方面的财政压力。

（3）对数据价值与内容缺乏认识。类似于上文提及对数字化能源管理系统价值的认识不足，许多已经部署数字化能源管理系统的企业对其收集的能源数据价值亦缺乏认识，导致企业内部对该类数据的管理、分析、交流等并不重视。甚至会出现收集了许多数据，但企业内部无人关注的情况。这一点受制于企业对能源数据含义缺乏理解，同时也受制于政府方面缺乏相应的引导和规定。企业还可能缺乏对能源数据有深入专业知识的人员，所以无法针对企业的能耗问题进行分析，找出能耗绩效提升点并实施相应优化方案。另外，若企业的数字化能源管理系统由第三方技术供应商搭建，供应商的通用性技术方案可能会与企业真实需求不匹配，导致企业无法对自身用能情况真正做到深入的分析和理解。

3 我国工业企业部署能管系统的建议

针对目前我国工业企业在部署能管系统所面临的挑战，本文提出：数字化能源管理系统应紧密结合用能状况与生产活动，基于数字化能源管理系统实时地测算分析单位产品在各生产步骤的最优能耗，得出产品的生产能耗标签，并推动建立能耗标签的行业标准化、普及化，让不同企业间建立统一的能耗信息“语言”，从而为企业生产人员提供具有价值的用能信息，辅助更快找到能源浪费。图 2 展示了分步骤化标准生产能耗标签的基本思想，以及数字化能源管理系统各利益相关者之间的关系。

3.1 能管系统能耗数据分析方法论

企业建设能管系统后，分析能源数据的方法论为：能源数据应分产品、分批次、分步骤进行分析，最终得出单位产品在各生产步骤的最低能耗值；基于该产品的生产流程，组成该产品的分步骤化标准生产能耗标签。

如前所述，现有数字化能源管理系统仅能做到对企业生产能耗的描述性分析。例如：报告厂房某日生产的总能耗，或是某生产设备某一小时的生产能耗曲线。然而，现有系统缺乏对能源浪费点的识别以及分析能力。本文提出数字化能源管理系统应更加紧密地结合用能情况与生产活动，具有识别增值能源（value-adding energy）与非增值能源（non-value-adding energy）的能力。增值活动与非增值活动的概念来自精益生产理念，增值活动是可以直接为企业客户创造价值的活动，而非增值活动则反之，被视为浪费。基于上述逻辑，生产中的增值能源即是为企业直接创造价值的用能。鉴于生产工厂最终输出的主要具有价值的产物是生产的产品本身，增值能源就是直接有助于产品生产的能源。

然而，分辨出增值能源与非增值能源具有挑战。各行业用能情况、用能设备、生产流程、生产规范等皆不相同，很难得出一个通用的区分增值能源与非增值能源的方法。本文借助于数字化能源管理系统实时监控能耗的能力，提出：应针对各生产步骤在生产单位产品的用能进行多批次的对比分析，了解每一生产

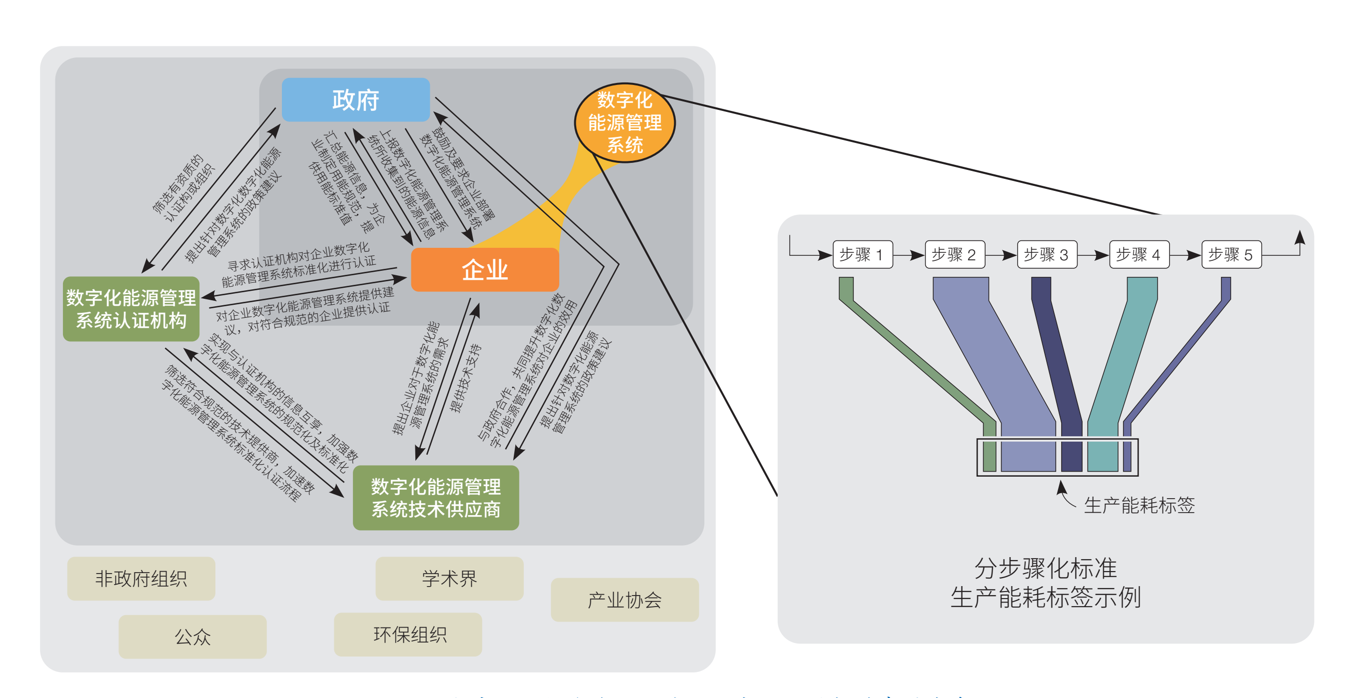


图 2　分步骤化标准能耗方法论及各方利益相关者的角色

Figure 2　Step-based standardized energy consumption methodology and roles of stakeholders

步骤中生产单位产品的最优用能情况，然后进行组合，得到该产品的分步骤化标准生产能耗标签。这样的能耗标签描述了1个产品在各生产步骤的最优用能，因此可以作为企业每1次生产用能的参考基准。该能耗标签能体现1个产品在各生产步骤的最优能耗值，因此可以方便企业在生产过程中快速定位能源浪费所处的生产步骤，识别能源浪费点。同时，对于生产步骤相同或相似的产品，该能耗标签建立了不同企业间对比分析的基础。能源效率偏低的企业可以对标优秀企业的能耗标签，找出自身能源浪费较多的步骤，从而发现能源浪费点并加以解决，最终实现降低全行业能源浪费。

分步骤化标准生产能耗标签概念尤其适用于高同质化的工业大宗商品。其同类型产品的生产流程极其相近，而且大宗商品的能耗以及温室气体排放占比也较高，仅钢铁和水泥就占全国26%的温室气体排放[10]。以水泥行业为例，采用新型干法水泥生产工艺的工厂生产流程均为：① 破碎及预均化；② 生料制备；③生料均化；④ 熟料烧制；⑤ 快速冷却熟料；⑥ 水泥粉磨[11]。如果可以基于此生产流程，识别各生产步骤中最优企业的最低单位能耗，将其组合即可得出新型干法水泥生产的水泥分步骤化标准生产能耗标签，这样的标签即可代表目前我国在此行业遵循此生产流程可达到的最优水平。

3.2 对我国工业企业部署数字化能源管理系统的总体性建议

（1）持续推动数字化能源管理系统在企业中的建设。目前我国各级政府已经开展相关工作鼓励企业部署数字化能源管理系统，但是这项任务仍道阻且长。各级政府应继续持续完善奖励机制，例如对采用数字化能源管理系统的企业给予税收优惠、补贴或者优先审批项目，以促使更多企业积极部署数字化能源管理系统。根据企业的用能量，首先针对“百千万”企业逐级推进数字化能源管理系统的部署，建立一套完善的监测与评估机制，并不断完善相关法律法规。建立跨部门协同监管机制，确保数字化能源管理系统的有效推广和应用。

（2）持续支持各利益相关方合作发展。为加强数字化能源管理系统在整个工业界中降低能源浪费的作用，应持续支持系统各利益相关方的合作发展（图2），尤其是用能企业与数字化能源管理系统技术提供商的合作。数字化能源管理系统技术提供商应多与其用户进行深入沟通，使系统更加针对性地帮助用能企业。能管系统认证机构应加强与用能企业、数字化能源管理系统技术提供商交流，与政府协作努力，助力实现数字化能源管理系统在工业界中的标准化、统一化。同时也应支持其他利益相关方参与到工业界数字化能源管理系统的发展之中，如：支持产学研协同发展，借助学术界的知识提升数字化能源管理系统的技术和管理。另外，学术界应着力培养具备能源管理和数字技术背景的复合型人才，为数字化能源管理系统的发展提供支持。

（3）逐步确定分产品、分生产步骤的能耗基准。为贯彻3.1中介绍的方法论，企业需通过分析自身产品生产在各生产步骤的最低能耗，得到产品的分步骤化标准生产能耗标签。这个能源可以为企业未来生产提供指导性建议，方便企业快速定位能源浪费所处的生产步骤。该方法论应进一步在全产业推广，对于生产步骤相同或类似的产品，应分析多家企业在各生产步骤的单位最优能耗，组合得出该产品品类的单位分步骤化标准生产能耗标签，作为生产能耗基准推广至全产业的所有企业中，进而辅助全产业发现能源浪费点。

（4）积极引领企业对标行业最优实践。客观上，企业在部署能管系统的知识与经验方面存在差异，为促进工业界在消除能源浪费方面取得进步，政府应识别筛选在能管系统部署方面最优实践的企业。树立行业标杆，总结最优实践企业的经验，推出相应文件为

其他企业详细介绍最优实践的相关经验，从而引领其他企业对标行业标杆。另外，对于单位产品能耗，在确认某一产品（或某一产品类别）的单位生产能耗基准后，应将其推广至全行业，在此过程中，需对生产能耗基准的数据来源进行解释，帮助企业了解单位生产能耗最优实践的具体情况。

4 结语

“双碳”目标既体现了我国作为国际大国对全球环境的责任担当，同时也表明我国认识到碳排放问题是影响未来全球经济社会发展的重要挑战。因此，我国主动推进碳减排的理念、策略和技术发展，引领世界变得更加清洁环保。

数字化能源管理系统可以帮助发现、识别能源浪费相关的问题，监控和优化能源使用，降低碳排放。在全球范围内，许多领先企业已成功应用数字化能源管理系统，并显著提高能源效率、降低碳排放。鉴于此，我国应大力推动其在工业界的应用，通过政策支持、行业合作、技术创新、定制化解决方案等措施，形成先进的低能源浪费的绿色产业集群。

全球碳排放问题关系到人类的生存和发展。推动数字化能源管理系统在工业界中的部署，是建设碳中和绿色地球的有效手段。人类想要更好地在这片美好的大地上长久地安居乐业，就必须建设更加绿色清洁的工业系统。为了达成这一项与每个人息息相关的重大事业，需要各方不断努力，早日实现全人类维护绿色地球的长远梦想。

致谢 英国剑桥大学工程系制造研究所可持续发展中心的 Mr. Awwal Sanusi Abubakar 对本文提出了富有建设性的建议。

参考文献

1 United Nations. Paris Agreement. Paris: United Nations, 2015.

2 International Energy Agency. CO_2 Emission in 2022. Paris: IEA, 2022.

3 Geng D, Evans S. A literature review of energy waste in the manufacturing industry. Computers & Industrial Engineering, 2022, 173: 108713.

4 Geng D, Evans S, Kishita Y. The identification and classification of energy waste for efficient energy supervision in manufacturing factories. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 182: 113409.

5 韩屹勍. 能管系统在水泥企业的作用. 四川水泥, 2020, (1): 6-7.
Han Y Q. Function of energy management system in cement enterprises. Sichuan Cement, 2020, (1): 6-7. (in Chinese)

6 Department of energy & climate change (DECC). Smart Grid Vision and Routemap. (2014-02-27) [2023-05-10]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/285417/Smart_Grid_Vision_and_RoutemapFINAL.pdf

7 OptimumE. ON. Energy efficiency and sustainability in 3 steps. (2021-05-27) [2023-05-09]. https://www. eon. com/content/dam/eon/eon-com/eon-com-assets/documents/business-customers/optimum/en/EON_Optimum_Whitepaper_2021_05_EN.pdf

8 Sweriges Riksdag. Lagen om energikartläggning i stora företag. 2014: 266.
Swedish Parliament. Laws on energy mapping in large companies. 2014: 266. (in Swedish)

9 何琦. 科技中心能源管理系统与能耗预测的研究. 济南: 山东大学, 2019.
He Q. Research on Energy Management System and Energy Consumption Prediction of Science and Technology Center. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)

10 温宗国, 李会芳. 中国工业节能减碳潜力与路线图. 财经智库, 2018, 3(6): 93-106.
Wen Z G, Li H F. Potential and roadmap of China's industrial energy saving and carbon reduction. Financial Minds, 2018, 3(6): 93-106. (in Chinese)

11 王旭. 基于生产流程的我国水泥工业碳减排潜力分析. 中国管理信息化, 2015, 18(1): 117-121.

Wang X. Analysis of carbon emission reduction potential of China's cement industry based on production process. China Management Informationization, 2015, 18(1): 117-121. (in Chinese)

Analysis and recommendations for energy conservation and carbon emission reduction in industry boosted by digital energy management systems

GENG Duanyang[1] XU Tong[2] ZHU Qinghua[3*] Steve EVANS[1]

(1 Institute for Manufacturing, Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FS, UK;

2 Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance, Department of Land Economy, University of Cambridge, Cambridge CB3 3QZ, UK;

3 Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Energy consumption during production processes in the industry is a main source of carbon dioxide emissions. Therefore, for China's dual-carbon goals, industrial enterprises need to focus on reducing energy waste to achieve energy-efficient production, thereby effectively reducing carbon emissions in industrial production. In recent years, with the continuous development and popularization of digital technology, digital energy management systems have played a crucial role in energy saving by visualizing invisible energy in the industry. In this context, this study first analyses the current status of digital energy management system applications in the UK, the US, Germany, and Sweden, summarizes their characteristics and conditions, and compares the differences between China's energy management system development and other countries'. Furthermore, this study explores the challenges faced by the government, technology, and enterprises in promoting the deployment of energy management systems in Chinese industrial enterprises. Next, the study proposes to analyse energy consumption from the perspective of product rather than factory, production lines, or machines. The concept of "unit product energy consumption label based on production steps" is defined, and a methodological framework for digital energy consumption data analysis based on this label is constructed. This study further discusses the roles of the major stakeholders, including governments, enterprises, digital energy management system technology providers, certification bodies, etc., in achieving standardization and unified analysis of energy consumption labels and puts forward suggestions for the government to develop digital energy management systems in the industry to reduce carbon emissions. The suggestions include: continuing to promote the construction of energy management systems in enterprises; continuously supporting the cooperative development among various stakeholders; gradually determining energy consumption benchmarks by product and production steps; and actively leading enterprises to benchmark industry best practices.

Keywords digital technology, energy waste, energy management, energy system, carbon neutrality

*Corresponding author

耿端阳　剑桥大学工程系制造研究所可持续发展中心博士生。主要研究领域:能源浪费、能源管理等。
E-mail: dg562@cam.ac.uk

GENG Duanyang　Ph. D. student at the Centre for Industrial Sustainability, Institute for Manufacturing (IfM), University of Cambridge. His research focuses on energy waste, energy management, etc. E-mail: dg562@cam.ac.uk

朱庆华　上海交通大学安泰经济与管理学院讲席教授。主要研究领域:可持续运营管理、企业低碳管理等。
E-mail: qhzhu@sjtu.edu.cn

ZHU Qinghua　Chair Professor at Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University. Her research focuses on sustainable operations management, corporate low-carbon management, etc. E-mail: qhzhu@sjtu.edu.cn

■责任编辑：张帆